



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Eletrônica e Microeletrônica



Equipamento eletrônico de baixo consumo com comunicação sem fio para auxílio nas inspeções de detecção de roubo de energia elétrica

Flávio José de Oliveira Moraes
Orientador: Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (Feec) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**, na área de concentração de Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Campinas – SP
Dezembro 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

M792e	<p>Morais, Flávio José de Oliveira</p> <p>Equipamento eletrônico de baixo consumo com comunicação sem fio para auxílio nas inspeções de detecção de roubo de energia elétrica / Flávio José de Oliveira Moraes. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.</p> <p>Orientador: José Antonio Siqueira Dias.</p> <p>Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.</p> <p>1. Furto. 2. Energia elétrica. 3. Sistema de comunicação sem fio. I. Dias, José Antonio Siqueira. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.</p>
-------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Título em Inglês: Electronic equipment with low power wireless communication to aid in inspections theft detection power

Palavras-chave em Inglês: Theft, Electric power, Wireless telecommunication systems

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Elnatan Chagas Ferreira, Wellington Avelino do Amaral

Data da defesa: 07-12-2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Flávio José de Oliveira Moraes

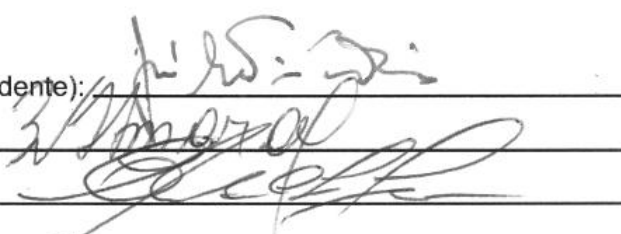
Data da Defesa: 7 de dezembro de 2011

Título da Tese: "Equipamento eletrônico de baixo consumo com comunicação sem fio para auxílio nas inspeções de detecção de roubo de energia elétrica "

Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias (Presidente):

Dr. Wellington Avelino do Amaral:

Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira:



A Deus, pela vida e pelas oportunidades. Aos meus pais pela total dedicação e incentivos. A minha namorada pelo apoio e amor. Aos meus amigos do peito que jamais me deixou sozinho e jamais serão esquecidos. Aos meus mestres que me ajudaram a escalar mais um degrau da vida e em especial a meu orientador pela amizade e por acreditar em meu trabalho.

Agradecimentos

A Deus, por ser soberano, supremo e detentor de tudo aquilo que é bom e justo.

Aos meus pais Ordeni e Osvaldo pelo amor, carinho e apoio dedicados desde o primeiro dia de minha existência.

À minha querida irmã Waléria pelo carinho e amizade. É bom saber que posso contar com seu apoio sempre.

À minha namorada Cris, pela ajuda, amor, dedicação e compreensão em virtude dos momentos que tive distante.

À empresa M & M Soluções Inteligentes em Segurança pelo apoio durante essa jornada e em especial ao Sr. Manoel Neco pela amizade e companheirismo.

Ao meu orientador, Prof. Siqueira, e ao Prof. Elnatan, pela oportunidade, amizade, orientação, atenção, auxílio e confiança.

À secretária Ester, aos colegas e amigos do departamento que contribuíram para a realização deste trabalho e em especial ao Luís Duarte pelo apoio.

À toda equipe da CPG/FEEC: Prof. Castro, Noêmia, Maria José, Edson, Jerusa e Bruna pela ajuda, apoio e amizade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Departamento de Eletrônica e Microeletrônica da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da UNICAMP (DEMIC), pela concessão da bolsa de estudo.

Não há nada de nobre em sermos superiores ao próximo. A verdadeira nobreza consiste em sermos superiores ao que éramos antes.

(Autor desconhecido)

Resumo

Um dos grandes problemas que as distribuidoras de energia no Brasil enfrentam é a perda de receita causada pelas chamadas perdas não técnicas, que são originadas principalmente por alterações no medidor, furto de energia elétrica e anomalias no medidor. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um equipamento de medição, com comunicação sem fio, de baixo custo e fácil aplicação, para realizar uma atividade de pré-inspeção com objetivo de avaliar a probabilidade de que a ligação sob investigação esteja com algum tipo de irregularidade (fraude ou anomalia no medidor).

O equipamento desenvolvido tem por base um sistema dotado de um transformador de corrente tipo “garra”, que devera ser ligado no ramal de entrada, entre a rede secundária e o poste do padrão de entrada do consumidor. O medidor mede e calcula uma integral discretizada no tempo da corrente RMS nas fases da ligação, antes do medidor convencional do cliente. Nos ensaios realizados em laboratório foi observado um erro máximo de $\pm 0,2\%$ e autonomia de bateria em torno de um ano. Em vários testes preliminares realizados em consumidores o sistema mostrou-se muito eficiente, sendo que em todos os testes foi possível identificar se o consumidor era fraudador ou não.

Palavras-chave: Furto, energia elétrica, comunicação sem fio, medidor, perdas não técnicas.

Abstract

A major problem that electricity utilities companies in emergent countries face is the loss of revenue caused by non-technical losses, which are originated mainly by fraud or theft of electricity. This work presents the development of a low-cost wireless measurement equipment that is used in a pre-inspection activity which will evaluate the probability that the customers under investigation is tampering with the meter or its meter has any technical problem.

The developed equipment is based on a electronic circuit with a clamp current meter which must be inserted between the pole connection and the customer's meter. The equipment measures and calculates, in a discretized mode, the time integral of the RMS current in the phases of the customer. Laboratory tests showed that a maximum error of $\pm 0,2\%$ was observed, and the battery life was estimated in at least one year. Several preliminary tests performed in controlled customers showed that the pre-inspection activity shall be very efficient, since all measured results indicate undoubtedly that those customers were not tampering with the meter.

Keywords: Theft, electricity, wireless communication, meter, non-technical losses.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xii
Lista de Abreviações.....	xiii
1 Introdução	14
1.1 OBJETIVOS	16
2 Projeto do Sistema.....	19
2.1 PROPOSTA DO SISTEMA	19
2.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA	19
2.3 DESCRIÇÃO DO HARDWARE DESENVOLVIDO	20
2.4 DESCRIÇÃO DO <i>FIRMWARE</i> DESENVOLVIDO	21
2.4.1 MÓDULO INTERROGADOR	22
2.4.2 MÓDULO MEDIDOR.....	26
2.5 TRANSFORMADOR DE CORRENTE TIPO “GARRA”	33
2.6 BATERIA	35
2.7 AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO	35
2.8 EMULADOR DE CORRENTE.....	37
3 Resultados Experimentais	38
3.1 <i>OFFSET</i> DOS MEDIDORES	38
3.2 ERRO RELATIVOS ENTRE MEDIDORES.....	40
3.3 CONSUMO DO MEDIDOR.....	41
3.3.1 CONSUMO: CONVERSOR SIGMA-DELTA	41
3.3.2 CONSUMO: COMUNICAÇÃO SEM FIO	43
3.4 EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO.....	44
3.5 EXPERIMENTO EM CAMPO	45

4	Conclusão	48
4.1	CONCLUSÃO	48
4.2	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	48
	Referências Bibliográficas	50

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Visão geral do Sistema.....	19
Figura 2.2 – Esquema elétrico do módulo medidor.....	20
Figura 2.3 – PCB do módulo medidor.....	21
Figura 2.4 – Módulo medidor final	21
Figura 2.5 – Fluxograma do procedimento interrupção RX	22
Figura 2.6 – Fluxograma do procedimento “TrataCaracteres”	23
Figura 2.7 – Fluxograma do procedimento genérico	24
Figura 2.8 – Fluxograma do procedimento RecebeDadosED	25
Figura 2.9 – Fluxograma do procedimento “le_um_ciclo”	27
Figura 2.10 – Fluxograma do procedimento guarda “giga”	29
Figura 2.11 – Fluxograma da interrupção do conversor Sigma-Delta.....	29
Figura 2.12 – Fluxograma do procedimento “zeraOffset”	30
Figura 2.13 – Fluxograma do procedimento gerar base de tempo	31
Figura 2.14 – Fluxograma do procedimento decide ativar o rádio	32
Figura 2.15 – Fluxograma do programa principal	33
Figura 2.16 – “Garra” para medida de corrente.....	34
Figura 2.17 – Erro de linearidade da “garra” [10]	34
Figura 2.18 – Curva de descarga da bateria a 25 °C [11]	35
Figura 2.19 – Amplificador de instrumentação utilizado para medir o consumo do módulo medidor.....	36
Figura 2.20 – Esquema elétrico do gerador de corrente	37
Figura 3.1 – Offset dos dispositivos testados	38
Figura 3.2 – Medidas realizadas na faixa de 0,04–1 A em um módulo calibrado com a nova metodologia	39
Figura 3.3 – Medidas realizadas na faixa de 40 mA a 100 A em um módulo calibrado com a nova metodologia	40
Figura 3.4 – Percentual de erro entre medidores testados em Laboratório.....	41
Figura 3.5 – Medidor em campo: Sigma-Delta a cada 1s.....	42
Figura 3.6 – Sigma-Delta: Amplitude e Período do pulso.....	42
Figura 3.7 – Rádio: Amplitude e Período do pulso	43
Figura 3.8 – Resposta dos medidores em relação a uma carga conhecida.....	44

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Frame de dados.....	26
----------------------------------	----

Lista de Abreviações

AP – *Access Point*

ASCII – *American Standard Code for Information Interchange*

AES – *American Electrical Systems*

A/D – *Analog-To-Digital*

ED – *End-Device*

IEC – *International Engineering Consortium*

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

LPM0 – *Low-powermode0*

P&D – *Pesquisa e Desenvolvimento*

PCB – *Printed Circuit Board*

RMS – *Valor Eficaz ou Valor Quadrático Médio*

SMCLK – *Sub-System Master Clock*

SP – *São Paulo*

SPI – *Serial Peripheral Interface*

TI – *Tecnologia da Informação*

Capítulo 1

Introdução

Um dos grandes problemas que as distribuidoras de energia no Brasil enfrentam é a perda de receita causada pelas chamadas perdas não técnicas, que são originadas principalmente por fraudes ou furto de energia elétrica. Elas atingem hoje um patamar de aproximadamente R\$ 20 bilhões por ano, ou seja, aproximadamente 15% de toda a energia distribuída no país, algo equivalente a uma Itaipu [1], [2], [3].

Para reduzir as perdas não técnicas, as concessionárias de energia fazem pesados investimentos em ações de controle e combate que envolvem a inspeção constante de suas redes em busca de fraudes e ligações clandestinas. Porém, os resultados práticos ainda são muito modestos, apesar do enorme esforço realizado. Para ilustrar, a AES Eletropaulo, uma das financiadoras deste trabalho através de um Projeto de P&D da ANEEL, informa que, comparando o ano de 2007 com o primeiro trimestre de 2008, conseguiu reduzir muito pouco o nível de suas perdas não técnicas, de 5,0% para 4,9%, embora venha realizando um esforço formidável nesta área, investindo algo em torno de R\$ 65 milhões por ano [2], [4].

Aumentar a eficiência econômico-financeira considerando os custos associados ao combate às perdas não técnicas e a receita recuperada por meio dessas ações é um grande desafio para as empresas de energia. As ferramentas tradicionais de tecnologia de informação (TI), embora tenham avançado muito no objetivo de identificar situações potenciais de perdas, não oferecem uma solução suficiente para o problema. As mais modernas metodologias de análise de bancos de dados e os sistemas inteligentes baseados em TI disponíveis, embora caríssimos, ainda fornecem um retorno marginal, pois o número de fraudes detectadas por inspeções convencionais, indicadas por essas análises é baixo. Faz-se necessário então avaliar uma solução

que envolva desde o desenvolvimento de novos equipamentos assim como a análise e revisão de procedimentos de trabalho tendo em vista a efetividade e a viabilidade do sistema como um todo [4].

Apenas para elucidar a baixa eficiência do processo atual de detecção de fraudes, no primeiro trimestre de 2008 para identificar 11,3 mil situações de fraude, foram realizadas 64,5 mil inspeções pela AES Eletropaulo, ou seja, menos do que dois acertos em cada dez inspeções, existindo, portanto, oportunidade para melhorar esse processo.

Apesar de outros projetos de P&D já terem sido desenvolvidos sobre o tema combate a fraudes, as pesquisas sobre o tema não identificou nenhum projeto que tratasse do desenvolvimento de um equipamento que pudesse ser instalado entre a rede secundária e o padrão de entrada do cliente e através de um processo rápido, eficiente e de baixo custo, pudesse contribuir para aumentar significativamente a taxa de sucesso na localização de fraudes.

A proposta deste trabalho é desenvolver um equipamento de fácil aplicação associado a um processo rápido e de baixo custo que possibilite aumentar o índice de acerto nas inspeções convencionais de forma contundente.

O equipamento deverá permitir a tomada de uma medição, antes do medidor do cliente, durante um período amostral que será comparada à leitura do medidor no padrão de entrada do cliente para o mesmo período. Se esta comparação apresentar divergência acima de parâmetros pré-determinados, a fraude potencial será indicada, sendo então realizada uma inspeção convencional no padrão de entrada do cliente.

Para tal, esse equipamento introduzirá uma nova atividade na rotina da detecção de fraude, a pré-inspeção. Esta pré-inspeção deverá ter custo muito mais baixo e anteceder as inspeções convencionais, sendo que estas últimas podem passar a ser realizadas somente a partir dos resultados da pré-inspeção. Se a pré-inspeção for efetivamente de baixo custo e de alta eficiência, será possível conseguir reduzir de forma significativa o custo do processo de detecção de fraude e aumentar a receita recuperada, já que o número de ligações recuperadas deverá aumentar consideravelmente.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um equipamento de medição de baixo custo, fácil aplicação e dimensões reduzidas, que possa ser fixado entre a rede secundária e o padrão de entrada do cliente de forma a permitir o aprimoramento do processo de inspeção de fraude. Este equipamento aplicado nas situações potenciais de fraude indicadas pelas análises de bancos de dados e tecnologias da informação (TI) já existentes, permite introduzir uma atividade de pré-inspeção antes da inspeção convencional. A pré-inspeção, que é não-invasiva, deverá ser rápida, eficiente, de baixo custo e a partir da análise de seus resultados, permitir aumentar o índice de acerto das inspeções convencionais.

A inspeção convencional é uma atividade complexa, dependente de equipamentos mais sofisticados e, portanto uma atividade cara, pois utiliza dois eletricitistas experientes, que examinam detalhadamente o padrão de entrada do cliente, buscando derivações de ligação ou adulterações no medidor. São também frequentes os casos onde a equipe perde produtividade pelo fato da casa estar fechada ou não haver um responsável no local que permita que a equipe entre em sua residência para fazer a inspeção. Aumentar a taxa de acerto das inspeções convencionais é um fator-chave para aumentar a eficiência e reduzir o custo do processo de detecção de fraudes.

O trabalho apresentado é simples, porém de execução complexa e sofisticada. O equipamento a ser desenvolvido tem por base um sistema dotado de “garra” tipo *clamp* de corrente, que possa ser ligado no ramal de entrada entre a rede secundária e o poste do padrão de entrada do consumidor sob suspeita, que servirá para medir e acumular o consumo de energia antes do padrão de entrada do local sob investigação.

Na atividade de pré-inspeção, este equipamento será instalado e ficaria no local por um período amostral (uma ou mais semanas) e para o mesmo período, será tomada a leitura no medidor do cliente. Após este período, ele será retirado e levado para um centro de análise para que o valor de sua leitura seja comparado com valor da leitura do medidor do cliente, ou avaliado em função do valor do consumo mensal histórico deste consumidor.

Havendo uma discrepância maior do que um determinado valor (determinado por meio de um estudo estatístico realizado em [3], a probabilidade de que este consumidor esteja roubando energia seja muito grande, e justifica que uma equipe técnica venha ao local para

realizar uma inspeção convencional nas instalações do padrão de entrada do cliente sob suspeita, com uma probabilidade muito maior de encontrar a provável ligação fraudulenta.

Entretanto, a implementação deste equipamento está longe de ser simples, pois uma série de desafios técnicos se apresenta no seu desenvolvimento, tais como:

- O equipamento deve ser de custo muito baixo para viabilizar a introdução de uma nova atividade de pré-inspeção, no processo de detecção de fraudes. Essa nova atividade e seu custo associado devem ser justificados pelo aumento da taxa de acerto na identificação de fraudes e pela redução dos custos do processo.
- O equipamento deverá ser robusto e confiável, pois ficará exposto a condições adversas, tais como: sol, chuva, altas temperaturas, entre outras. Também deverá ter durabilidade de pelo menos um ano, para tornar-se economicamente viável, demandando a utilização de tecnologia eletrônica no estado-da-arte e de baixo consumo, para poder operar com baterias.
- A instalação na rede de entrada do consumidor deve ser rápida e simples (tempo estimado inferior a 5 minutos), para que as equipes de pré-inspeção possam se deslocar entre os locais onde consumidores suspeitos estejam e realize um número adequado de instalações por dia. Para atingir essa meta, foi desenvolvido um dispositivo mecânico que permite a instalação do equipamento do solo [4].
- O equipamento de cada fase deverá ser discreto, com as dimensões semelhantes às de um controle remoto de TV, externas, para que o consumidor não perceba a sua presença depois de instalado. A instalação do equipamento deverá ser fácil e ao mesmo tempo suficientemente robusta, e não deve chamar a atenção do consumidor, para evitar que o consumidor "desconfie" que está sendo inspecionado e eventualmente remova a ligação que está roubando energia;
- O equipamento deverá ter boa precisão, de forma a não fornecer resultados falsos. A tecnologia de medida a ser utilizada deverá prescindir da medida da tensão, para a facilidade de instalação do equipamento, o que introduz uma incerteza na medida. Deve-se lembrar de que, além desta incerteza, estes equipamentos não medirão a potência reativa, desta forma, em clientes onde medidor eletrônico com capacidade de medida de potência reativa estive instalado, a incerteza na leitura será maior. Estudos estatísticos em

situações reais de campo serão necessários para determinar os parâmetros das diferenças entre a medição por este equipamento e a efetivamente registrada pelo medidor do cliente, que realmente indicarão forte indício de fraude e o que é incerteza no dado obtido.

- Após a retirada e levado ao centro de análise, a leitura dos dados deve ser fácil e automática, para que não ocorram erros humanos nesta etapa. Será necessário desenvolver uma tecnologia para que essa comunicação possa ser realizada com custo muito baixo. A comunicação também não pode empregar conectores, pois estes ficariam expostos ao tempo e rapidamente estariam inutilizados. Uma nova forma de realizar esta leitura sem contatos deve ser desenvolvida para atender às necessidades de custo e desempenho simultaneamente.
- A leitura deve ser, além de automática, incorporada em um programa que forneça um diagnóstico rapidamente, evitando que seja necessária uma etapa de decisão humana.

A pesquisa que culmine com o desenvolvimento de um equipamento com todas as características acima apresentadas será, sem dúvida, um ponto marcante no início de uma nova era na detecção de fraudes e roubo de energia. O objetivo é desenvolver alguns protótipos de laboratório (para serem testados, verificando a sua funcionalidade, precisão, índice de acerto, facilidade de instalação, estabilidade térmica, estabilidade ao longo do tempo e outros parâmetros críticos, em ambiente controlado). Nestes testes serão detectadas necessidades de mudanças e alterações no projeto, que após serem implementadas e aprovadas, serão testadas em campo.

Para teste em campo deverão ser aplicados um número suficiente de equipamentos para que os resultados estatísticos possam levar ao seu aperfeiçoamento e comprovação da sua utilidade para a detecção de fraudes. O teste, para ser válido, terá que ter necessariamente apoio da logística do setor de detecção de fraudes da AES Eletropaulo, introduzindo em um teste piloto a nova atividade de pré-inspeção. Além disso, no teste de campo, tanto a instalação como a retirada do equipamento bem como a leitura e análise de dados deverá ser feita pelas equipes da AES Eletropaulo, para verificar a praticidade do processo.

Capítulo 2

Projeto do Sistema

2.1 Proposta do Sistema

Conforme descrito no capítulo 1, o presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um equipamento de auxílio no combate às perdas não técnicas causadas por fraudes, furto de energia elétrica ou anomalia nos medidores.

2.2 Desenvolvimento do Sistema

O sistema de medição pode ser dividido em duas partes: módulo interrogar e módulo medidor. A Figura 2.1 apresenta uma visão geral do sistema proposto.

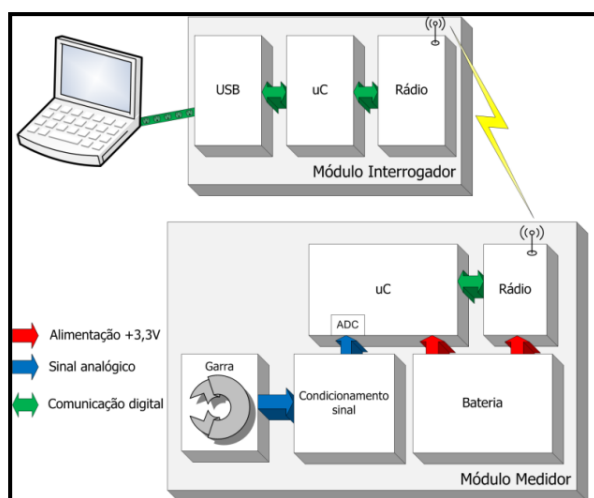


Figura 2.1 – Visão geral do Sistema

O módulo interrogador é responsável por realizar o interfaceamento entre o módulo medidor e o computador, via comunicação wireless.

Já o módulo medidor é responsável por realizar as medidas de corrente de forma indireta e armazená-la por um determinado período.

2.3 Descrição do Hardware Desenvolvido

O núcleo do módulo medidor é composto por um microcontrolador da família MSP430AFE2xx da *Texas Instruments* [5]. Uma das principais características que motivou a escolha desse micro foi seu baixo consumo energético, que operando a 2 MHz em LPM0 (*Low-power mode 0*) e com o SMCLK (*Sub-SystemMaster Clock*) habilitado consome apenas 250 μ A.

Para o cálculo da corrente RMS serão utilizados dois periféricos importantes: multiplicador por hardware e o conversor sigma-delta de 24bits. A Figura 2.2 mostra o esquemático do *hardware* desenvolvido, na parte superior se encontra o microcontrolador e na inferior o rádio utilizado.

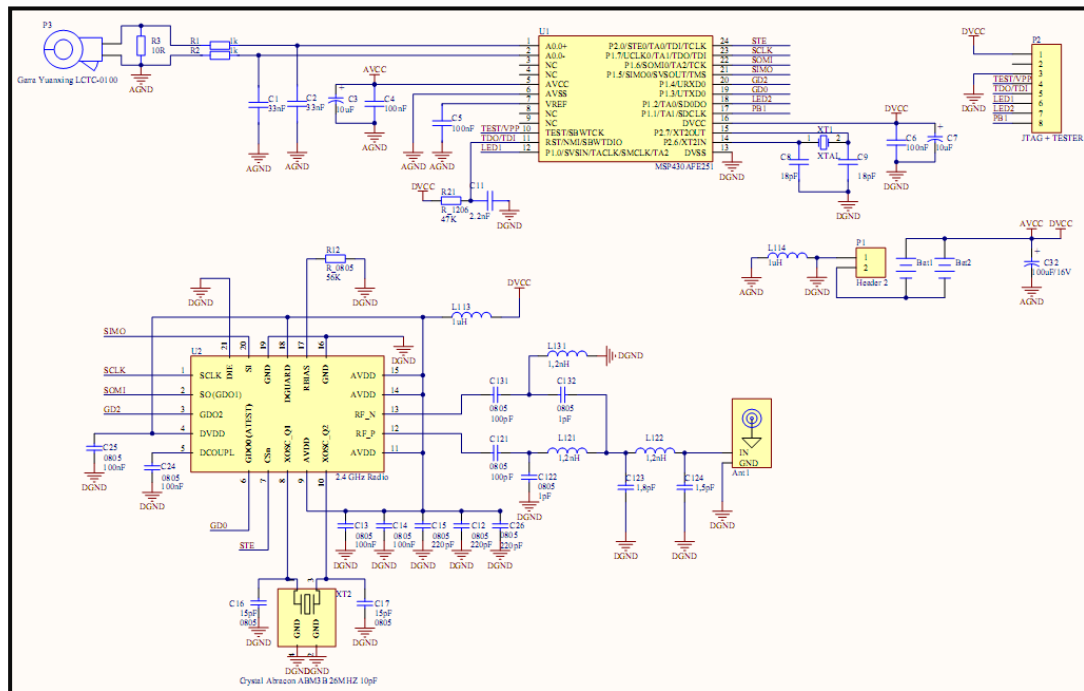


Figura 2.2 – Esquema elétrico do módulo medidor

A comunicação sem fio é realizada através do rádio CC2500 [6], que opera na faixa de frequência 2.4–2.483.5 GHz e segue o padrão IEEE 802.15.4. A comunicação do rádio com o microcontrolador utiliza o barramento SPI para troca de dados [7].

Para irradiação de RF foi utilizado o chip antena W3008 do fabricante *Pulse Electronics* [8], que possui diagrama de irradiação omnidirecional. Suas características são: baixo custo, baixo perfil e tamanho bastante reduzido, compatível com SMD, que são requisitos no projeto do módulo medidor.

O *layout* do módulo medidor desenvolvido é apresentado na Figura 2.3 e na Figura 2.4 é mostrado ED final.

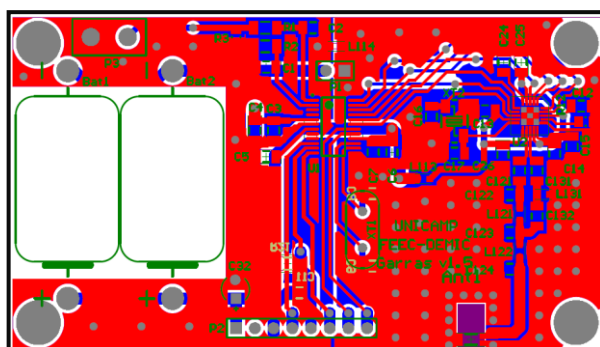


Figura 2.3 – PCB do módulo medidor



Figura 2.4 – Módulo medidor final

Já o *hardware* do módulo interrogador foi utilizado o *dongle* da *Texas Instruments* eZ430-RF2500 [9], que possui microcontrolador, comunicação via wireless e comunicação com o computador via USB. Para este módulo foi desenvolvido somente o software para realizar as requisições ao medidor.

2.4 Descrição do *Firmware* Desenvolvido

O sistema de medição é composto por dois subsistemas: módulo interrogador, também chamado de *Access Point*(AP), e módulo medidor, também chamado de *End-Device* (ED). Ns tópicos seguintes serão abordados o desenvolvimento do *firmware* para cada um destes subsistemas, bem como apresentadas as particularidades de cada módulo.

2.4.1 Módulo Interrogador

O módulo interrogador é responsável por enviar requisições ao módulo medidor, utilizando comunicação sem fio, e receber dados do mesmo para transmitir ao computador que irá processar os dados, utilizando comunicação serial.

Para enviar comandos aos módulos medidores é necessário utilizar um programa terminal disponível, tal como: RcomSerial ou PuTTY. Assim, todo carácter ASCII digitado é enviado ao ED para ser tratado posteriormente. A Figura 2.5 mostra o procedimento implementado para tratar os comandos.

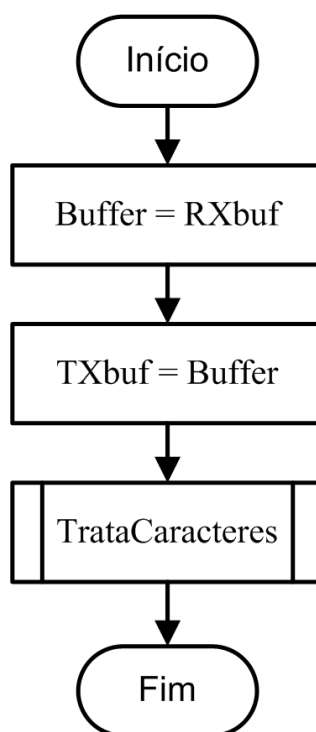


Figura 2.5 – Fluxograma do procedimento interrupção RX

Toda vez que o *hardware* sinaliza que há uma interrupção de recepção de dado pendente, esse procedimento é executado repassando o caractere digitado pelo usuário ao procedimento “TrataCaracteres”.

O procedimento “TrataCaracteres” é responsável por verificar qual caractere alfabético foi digitado e em seguida chamar a função para tratá-lo. Já para caracteres numéricos ele pode simplesmente armazená-los (unidade, dezena, centena, etc) esperando pelo seu complemento para formar um endereço de ED válido, como mostra a Figura 2.6 abaixo.

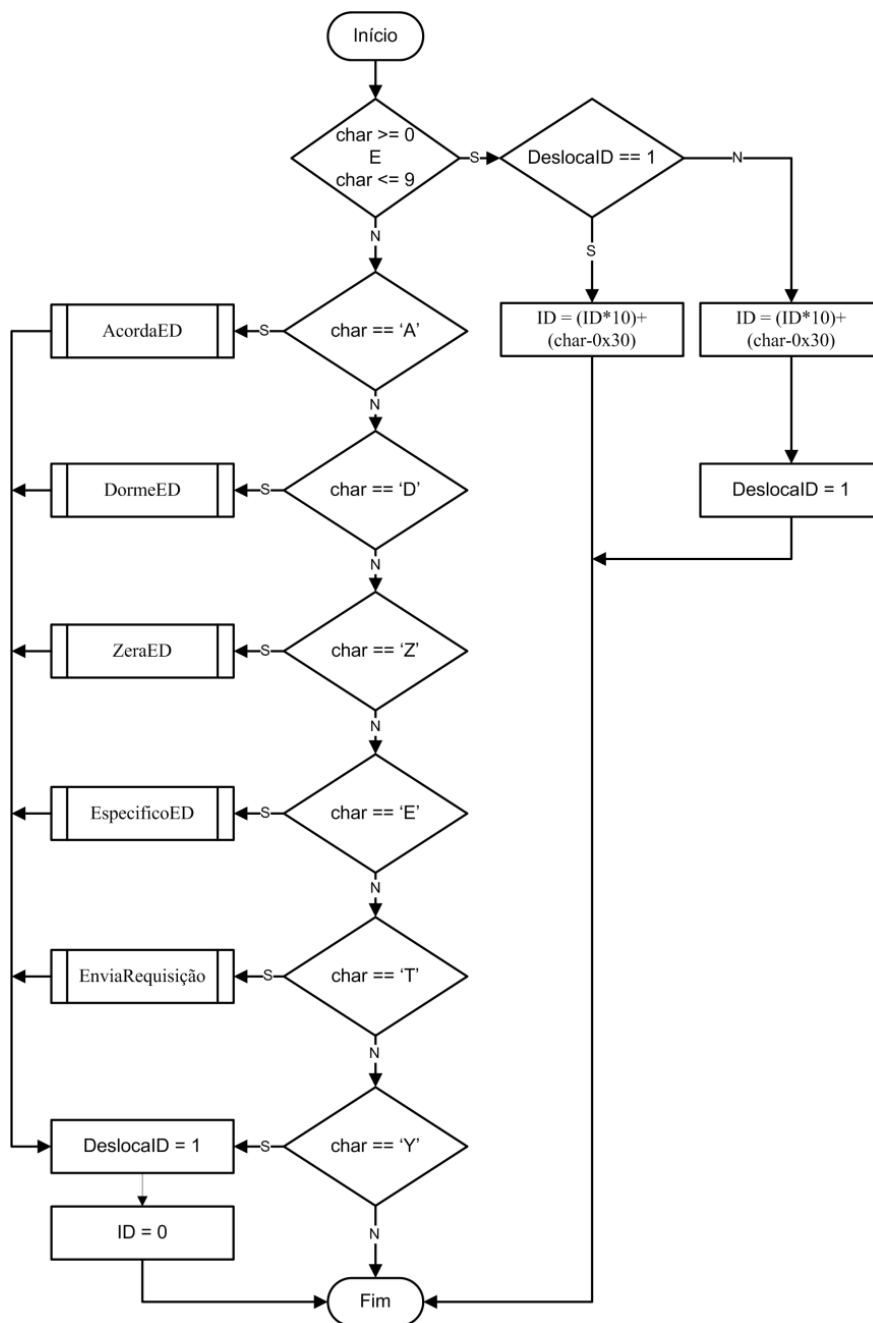


Figura 2.6 – Fluxograma do procedimento “TrataCaracteres”

Os procedimentos AcordaED, DormeED, ZeraED, EspecificoED e EnviaRequisição são bastante similares quanto à sua estrutura, diferenciando-se apenas no tipo de requisição que os mesmos enviam aos módulos medidores. Portanto, para minimizar a quantidade de fluxogramas, é apresentado apenas um, e as diferenças entre eles são descritas no texto. A Figura 2.7 apresenta o fluxograma genérico implementado.

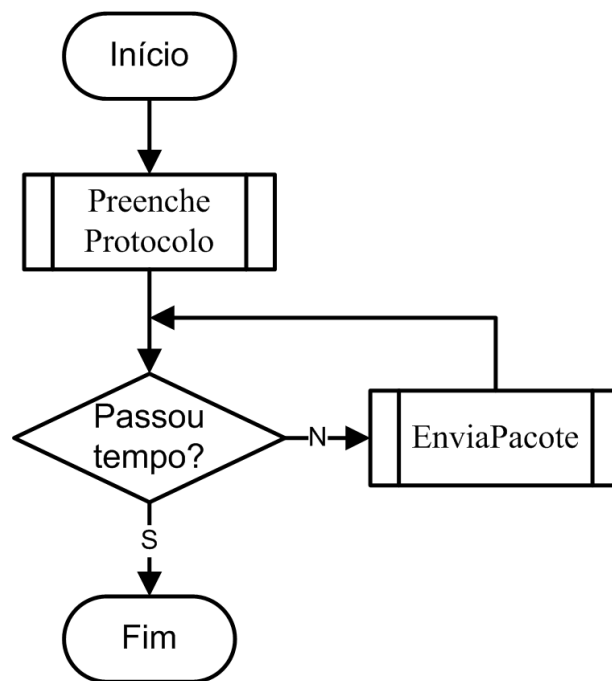


Figura 2.7 – Fluxograma do procedimento genérico

O procedimento AcordaED idêntico ao da Figura 2.7, como o próprio diz tem a função de acordar todos os ED ou um medidor específico através de mensagem de *broadcast*. No caso de um medidor específico, é necessário especificar o endereço do dispositivo.

Como exposto anteriormente, os medidores acordam de cinco em cinco segundos, ficam ativos por 10 ms, e voltam a dormir. Portanto, as mensagens para acordar o ED são enviadas durante 6 s, para garantir que eles acordem. No diagrama da Figura 2.7 esse tempo é representado pelo “Passou tempo”.

O procedimento DormeAD é executado sempre que for necessário colocar todos os medidores (ou um em especial) para dormir, e são enviadas mensagens durante 1 s (Passou tempo).

No caso de ZeraED, sempre que desejar-se zerar os dados das medidas realizadas pelos ED é necessário executá-lo. São enviadas mensagens de *broadcast* para zerar os dados durante 0.5 s (Passou tempo).

Para solicitar os dados de um período de medição é necessário executar o procedimento EnviaRequisição. Porém, antes informar o endereço do medidor, é necessário que o mesmo esteja ligado para solicitar os dados.

Já o procedimento EspecificoED foi implementado para facilitar as requisições específicas dos dados. É necessário informar o endereço do medidor e digitar “E” para obter os dados.

A recepção dos dados enviados pelo módulo medidor são tratadas pelo procedimento RecebeDadosED, que utiliza interrupção por *hardware* para sinalizar o recebimento, como mostra a Figura 2.8 abaixo.

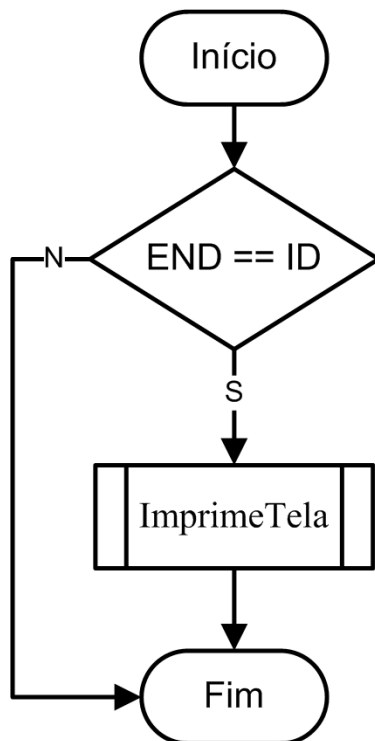


Figura 2.8 – Fluxograma do procedimento RecebeDadosED

Como as requisições de envio de dados são enviadas pontualmente para cada medidor, o AP espera que após cada solicitação ele receba os dados pertencentes a tal medidor. Ao chegar um frame de dados, é verificado se estes pertencem ao ED requisitado. Se verdadeiro, imprime-se na tela as informações contidas no frame. Caso as informações não pertençam ao medidor solicitado, os dados são ignorados.

Todo pacote de dados recebido pelo AP contém as seguintes informações: um indicador de início de frame; campo para endereçar os ED, que é composto de 32 bits o qual possibilitaria endereçar mais de 4 bilhões de dispositivos; quatro campos para armazenar os dados referentes a Corrente (Corrente LO + Giga LO e Corrente HI + Giga HI) no qual cada um é

composto de 48bits; para a calibração são disponibilizados 48bits. Por fim, tem-se os dados referentes ao nível de carga da bateria e o indicador de fim de frame.

Tabela 2.1 – Frame de dados

8bits	32bits	8bits	32bits	32bits	16bits	16bits	48bits	16bits	8bits
Start	END	Controle	Corrente LO	Corrente HI	Giga LO	Giga HI	Calibração	Nível Bateria	Stop

No *firmware* do módulo medidor, ao realizar-se uma requisição de dados pelo AP, esse *frame* é preenchido com as informações das medidas realizadas.

2.4.2 Módulo medidor

O *firmware* do módulo medidor é composto por varias funções e procedimentos. Um dos principais componentes é o procedimento “ler_um_ciclo”, que possui a função de detectar o cruzamento do zero da rede, bem como ler três ciclos da mesma.

A cada segundo este procedimento é invocado para verificar e acumular a corrente instantânea. Inicia-se ativando a conversão A/D, que foi previamente configurada com uma taxa de amostragem de 3906 amostras/segundo.

As duas primeiras amostras lidas são armazenadas e, em seguida, é realizada uma comparação para verificar se foi encontrado o primeiro cruzamento de zero. Entre cada amostra é ativado o modo de espera do microcontrolador para economizar bateria.

Após a realização da comparação e a constatação que não foi encontrado o cruzamento do zero, verifica-se se o número de amostras é superior a 70, que é o máximo de tentativas para encontrar o primeiro zero. Caso isto seja verdadeiro, então é finalizada a procura e espera o próximo segundo para realizar uma nova tentativa de se encontrar um cruzamento de zero. Se não, transfere-se a amostra 1 para a amostra 0 e espera-se ler a próxima amostra, para iniciar o ciclo novamente.

Quando for encontrado o primeiro cruzamento de zero (do semiciclo negativo para o positivo) a primeira amostra é colocada no multiplicador por hardware e o resultado é acumulado no *buffer*. A Figura 2.9 apresenta o fluxograma de funcionamento do procedimento “ler_um_ciclo”.

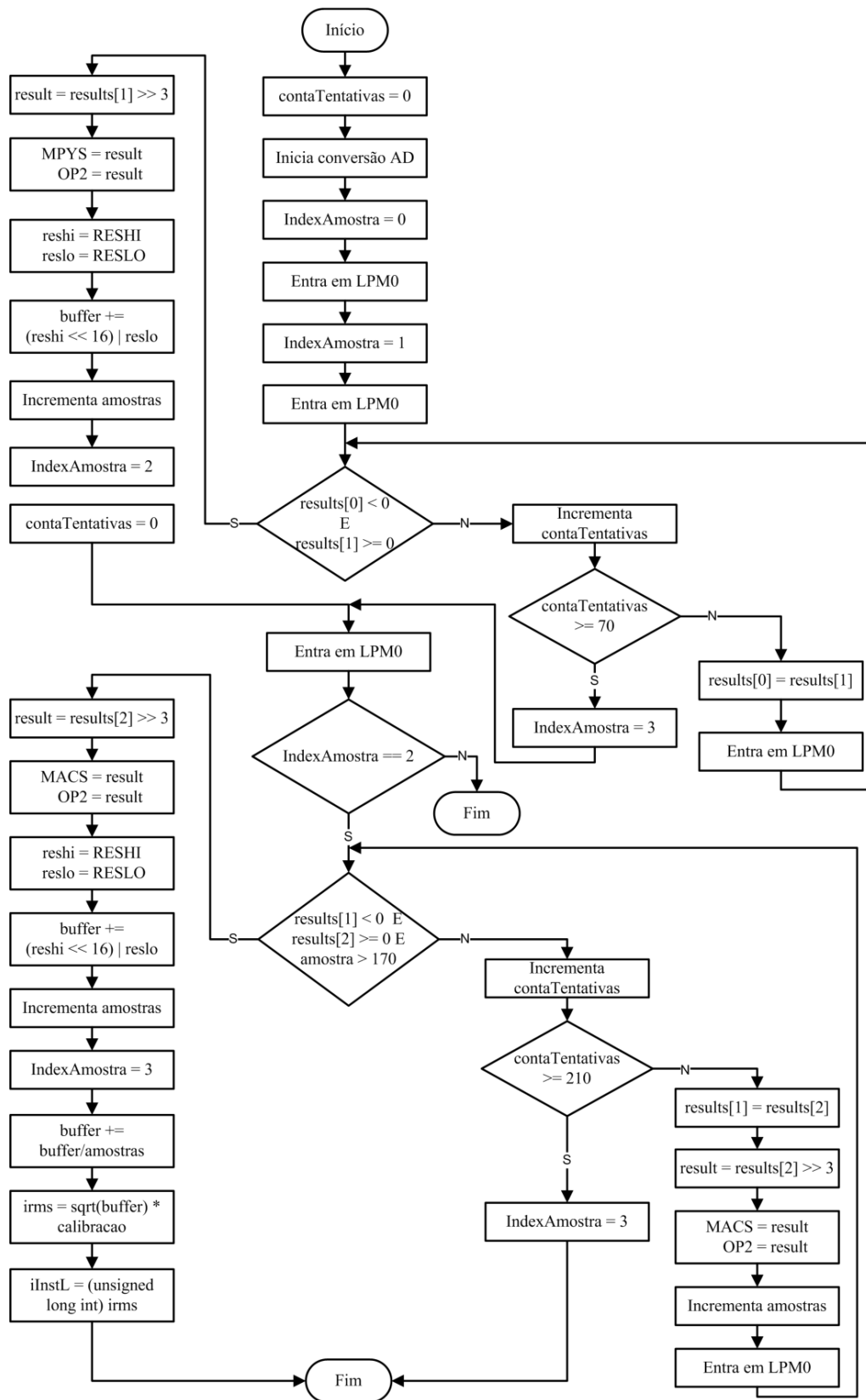


Figura 2.9 – Fluxograma do procedimento “le_um_ciclo”

Após encontrar o primeiro cruzamento de zero, serão amostrados aproximadamente 198 pontos (que são três ciclos da rede), e o resultado vai sendo acumulado no registrador multiplicador MACS. Finalizado a amostragem dos pontos, o valor acumulado para os três ciclos é lido através dos registradores RESHI (bits mais significativos) e RESLO (bits menos significativos). Em seguida concatenam-se os resultados dos dois registradores em uma única variável é calcula-se o valor médio utilizando o número de pontos amostrados. Finalmente, calcula-se o valor da corrente RMS através do valor médio. Portanto, o cálculo da corrente RMS segue a formula 2.1 abaixo, onde:

- N – é o numero de amostras;
- k – índice de amostras;
- i – amostra da corrente;
- I_{RMS} – corrente RMS calculada.

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_k i_k} \quad (2.1)$$

Inicialmente o medidor foi projetado para acumular 2^{32} unidades de amostra. Porém, em testes realizados em laboratório constatou-se que, para correntes elevadas, esse número não era suficiente para realizar medidas por longos períodos. Para solucionar esse problema, foi criado um procedimento para aumentar a quantidade de amostras que o medidor pode guardar. A Figura 2.10 mostra o fluxograma do procedimento.

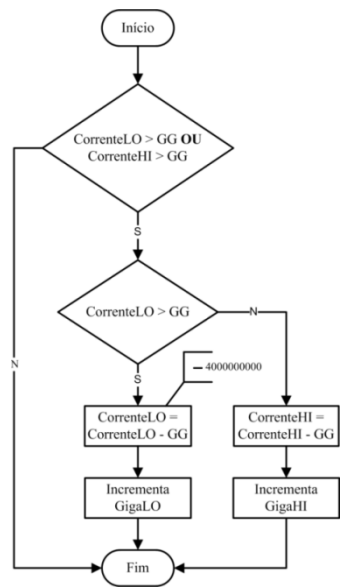


Figura 2.10 – Fluxograma do procedimento guarda “giga”

Após ler uma série de amostras é verificado se o acumulador ultrapassou 4 Gb. Caso verdadeiro, então decrementa-se esse valor do acumulador e incrementa-se apenas uma unidade ao acumulador de “giga”. Essa técnica é aplicada tanto para CorrenteLO como para CorrenteHI.

O vetor de interrupção do conversor sigma-delta é utilizado para processar três tarefas distintas: medir corrente, zerar *offset* e verificar o nível da bateria. A Figura 2.11 apresenta o fluxograma em questão.

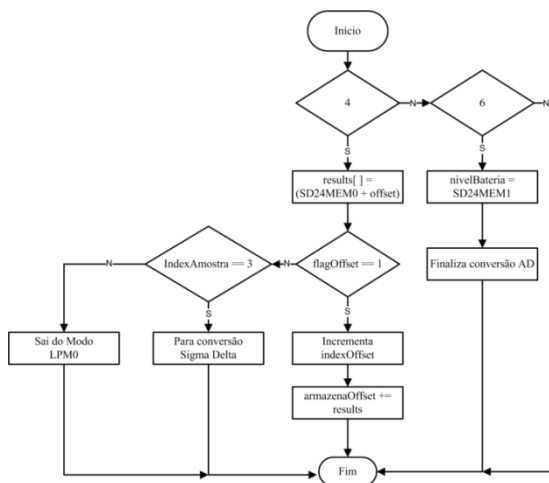


Figura 2.11 – Fluxograma da interrupção do conversor Sigma-Delta

No caso da medida da corrente, após ser detectado que o sinal cruzou o primeiro zero (de negativo para positivo), todas as próximas amostras do conversor A/D são salvas. Quando o número de amostras indica que o terceiro ciclo da rede está sendo lido, no momento do terceiro cruzamento de zero completa-se o conjunto de amostras necessárias para calcular a corrente RMS média em três ciclos da rede, e o microcontrolador para a conversão. As novas conversões só serão iniciadas no próximo período de medida (no intervalo de 1 segundo).

Um dos pontos fundamentais no projeto do módulo medidor foi gerenciar o consumo energético de forma eficiente, para que o mesmo apresente autonomia alta. Para tal foi necessário monitorar a tensão de alimentação do módulo e, no instante de maior consumo, que é ao realizar-se a comunicação, atualiza-se o valor do nível da bateria do módulo.

Nos primeiros testes realizados em laboratório foi constatado que o medidor apresentava um pequeno valor de saída quando não estava realizando medidas, isso em decorrência do *offset* do conversor A/D.

Para zerar o *offset*, foi criado um procedimento que ao iniciar o módulo são adquiridas 100 amostras e no final é extraída a média destes valores, atribui-se o valor da média como o *offset* do sistema, como mostra a Figura 2.12.



Figura 2.12 – Fluxograma do procedimento “zeraOffset”

Para realizar a integração da corrente a cada segundo, foi utilizada uma base de tempo gerada por um timer do microcontrolador no qual a cada segundo é gerada uma interrupção que ativa a leitura dos ciclos da rede. A Figura 2.13 apresenta o diagrama de funcionamento do timer utilizado.

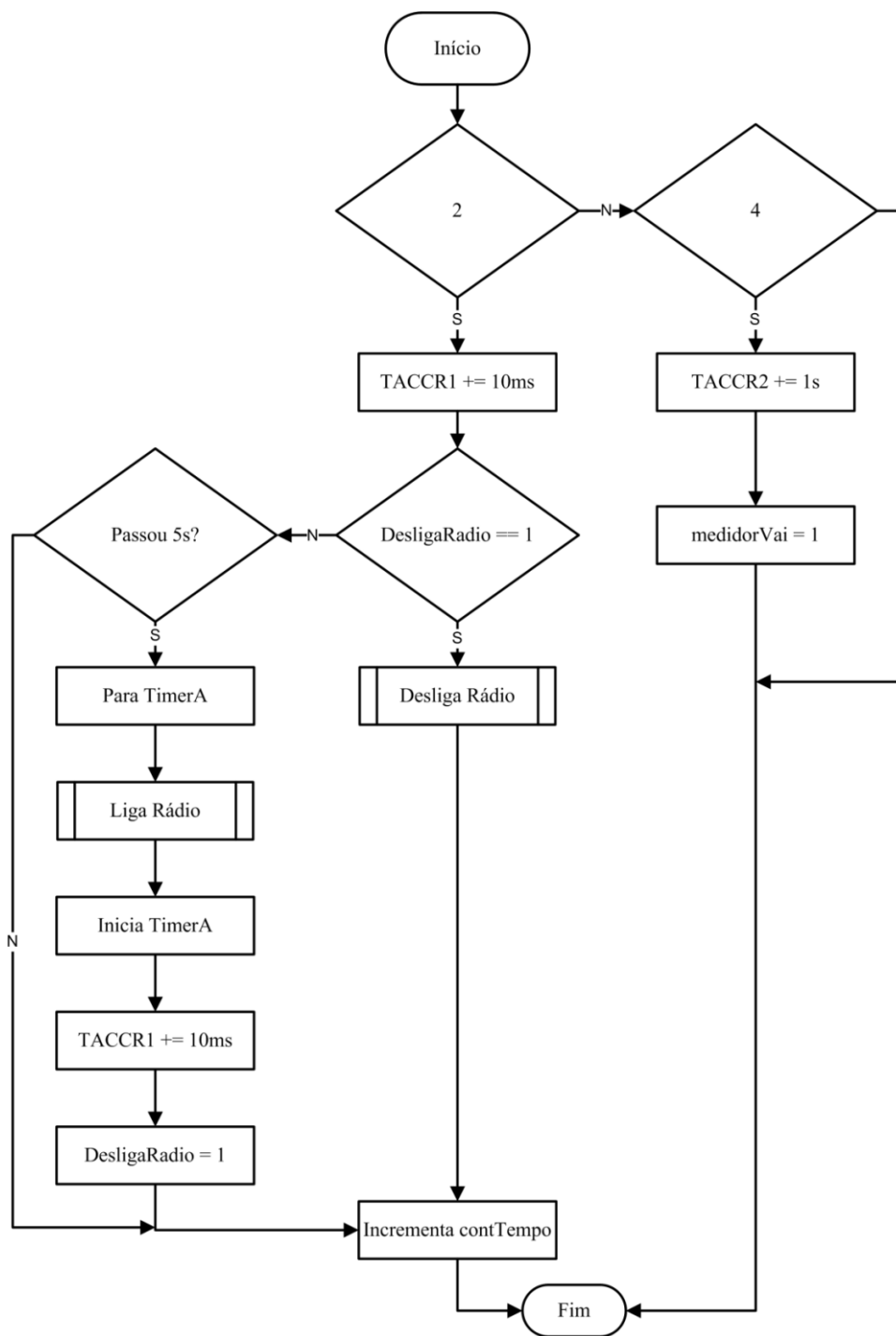


Figura 2.13 – Fluxograma do procedimento gerar base de tempo

Além da base de tempo já apresentada, foi utilizada outra para controlar o status do rádio. Como o maior consumo energético provém da ativação do mesmo, foi necessário deixá-lo desligado o máximo tempo possível. Assim, a cada 5 segundos ele é ativado e espera-se por uma requisição. Se em 10 ms não chegar uma informação solicitando que ele permaneça ativo, o mesmo volta a dormir.

Objetivando reduzir ainda mais o consumo do módulo, foi implementado um procedimento para desligar o rádio quando for detectado uma corrente superior a 40 mA, como apresentado na Figura 2.14. Isso se faz, pois se o sistema estiver medindo correntes maiores do que 40 mA (que é o valor de partida dos medidores convencionais), é porque ele está instalado no circuito do cliente, e não há motivo para o rádio ligar.

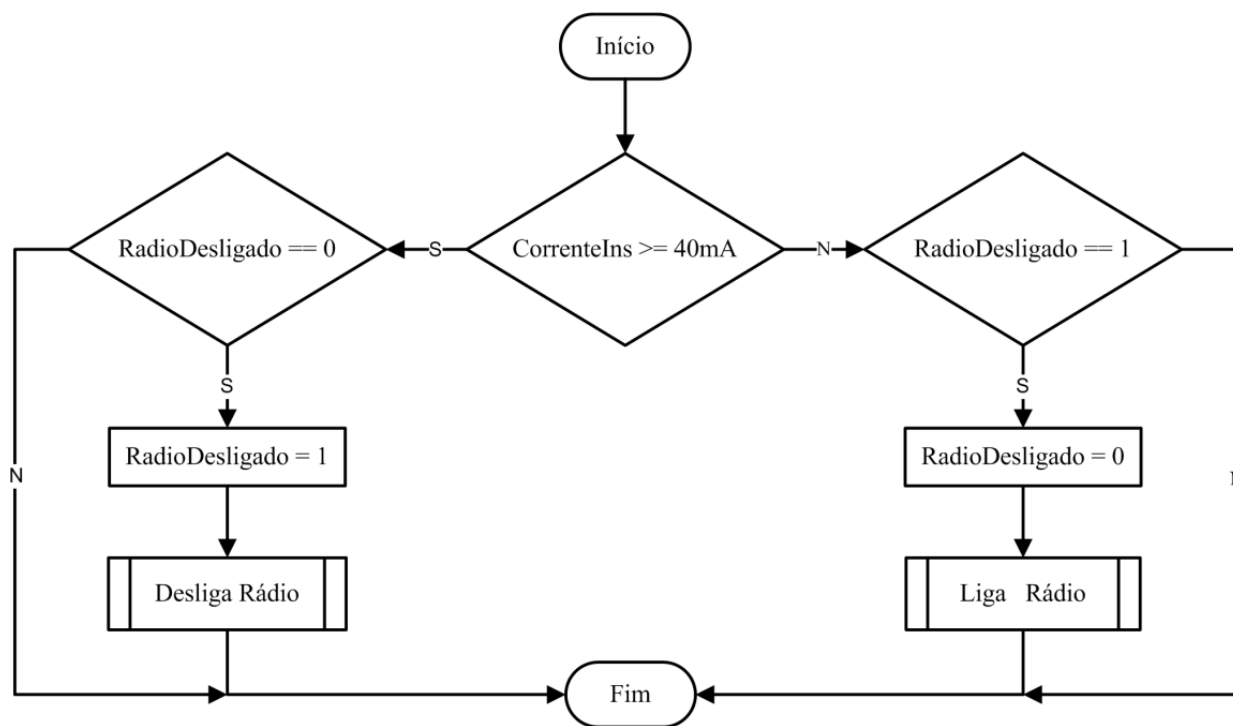


Figura 2.14 – Fluxograma do procedimento decide ativar o rádio

Finalmente, apresenta-se a análise do procedimento do programa principal, onde são configurados: *clock* do sistema, o conversor sigma-delta, a comunicação SPI e o rádio, como apresentado na Figura 2.15.

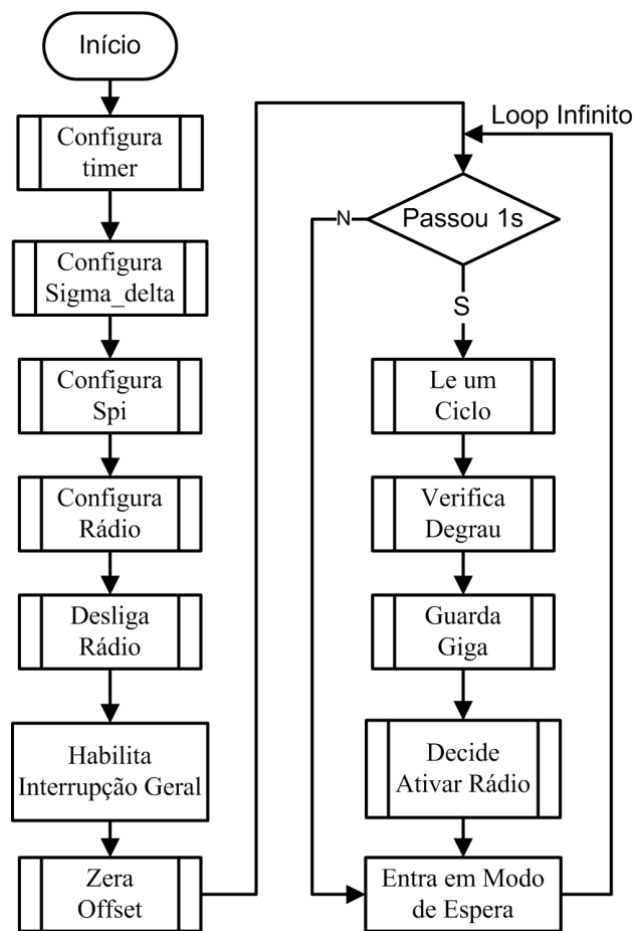


Figura 2.15 – Fluxograma do programa principal

Depois de realizar as configurações iniciais, zera-se o *offset* do medidor antes de entrar no loop infinito. A cada segundo é realizado a leitura do conjunto de amostras, que representa três ciclos da rede, e em seguida, é verificado se ocorreu um degrau positivo ou negativo da corrente instantânea em relação à amostra anterior. Logo após é verificado se o acumulador está próximo de “estourar”. Finalmente é verificado se a corrente instantânea é maior que 40 mA, objetivando desligar o rádio para economizar bateria.

2.5 Transformador de corrente tipo “garra”

Um dos principais requisitos no projeto do módulo medidor eram a praticidade e a rapidez no momento de sua instalação, já que o equipamento será fixado entre a rede secundária e o padrão de entrada do cliente e não poderia levantar suspeita quanto sua existência.

Para tal, foi especificado um transformador de corrente do tipo “garra” com núcleo de ferro monocristalino que permite realizar medições de corrente através da indução de campo magnético, como apresentado na Figura 2.16.



Figura 2.16 – “Garra” para medida de corrente

A “garra” atende a norma internacional IEC 60044-1 e possui as seguintes características que são relevantes no projeto do módulo medidor são: baixo custo, dimensões reduzidas, grande segurança no momento da instalação e erro de linearidade bastante reduzido, na ordem de 0,2%, como mostra a Figura 2.17.

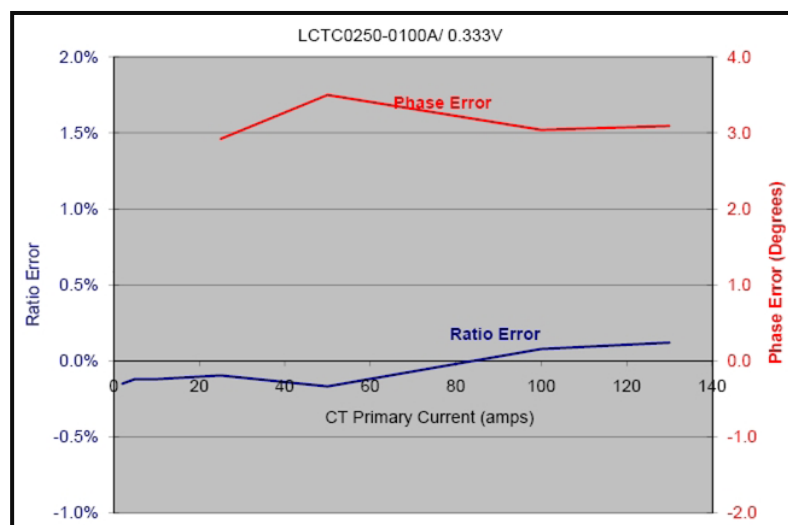


Figura 2.17 – Erro de linearidade da “garra” [10]

É importante lembrar que o erro de rotação de fase apresentado pela “garra” não interfere na medida.

2.6 Bateria

Um dos principais componentes do módulo medidor é a fonte de alimentação, que é suprida por uma bateria de lítio cloreto de tionila, com tensão de 3,6 V e capacidade de 1200 mAh.

Esta bateria apresenta uma característica muito interessante para o projeto, pois ela mantém uma tensão praticamente constante até o fim de sua vida útil, como mostra a Figura 2.18.

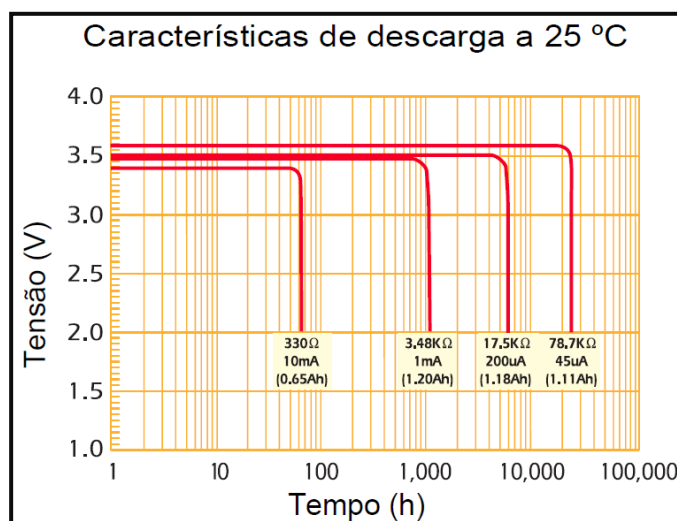


Figura 2.18 – Curva de descarga da bateria a 25 °C [11]

Portanto, a escolha do modelo de bateria ER14250 está relacionado à sua característica de descarga, uma vez que o medidor necessita de uma tensão mínima para manter o sistema funcionando.

2.7 Amplificador de Instrumentação

Um dos principais desafios encontrados no projeto do módulo medidor foi reduzir o consumo do mesmo para atender os requisitos quanto à duração da bateria (estabelecida como no mínimo de um ano).

Inicialmente, para verificar o consumo dos módulos, foi utilizado um multímetro de bancada de alta precisão que realizava três amostras por segundo e calculava a média da corrente consumida. Porém, com essa estratégia não foi possível verificar os picos de consumo quando o conversor sigma-delta e o rádio ficavam ativos, bem como a largura do pulso dos mesmos.

Em outra abordagem, foi utilizado um osciloscópio para medir a tensão sobre uma resistência conhecida, o qual poderia indicar o perfil de consumo do módulo. Também não se obteve êxito com essa estratégia, pois o consumo do módulo era razoavelmente baixo, na ordem de $300\ \mu\text{A}$ e, conseqüentemente a saída apresentada pelo osciloscópio era muito próxima do nível do ruído, no qual não conseguia-se definir o padrão de consumo procurado.

Para sanar esses problemas, foi projetado um circuito utilizando amplificador de instrumentação [12] que possibilitou levantar as curvas de consumo do módulo. A Figura 2.19 apresenta o esquemático do circuito confeccionado.

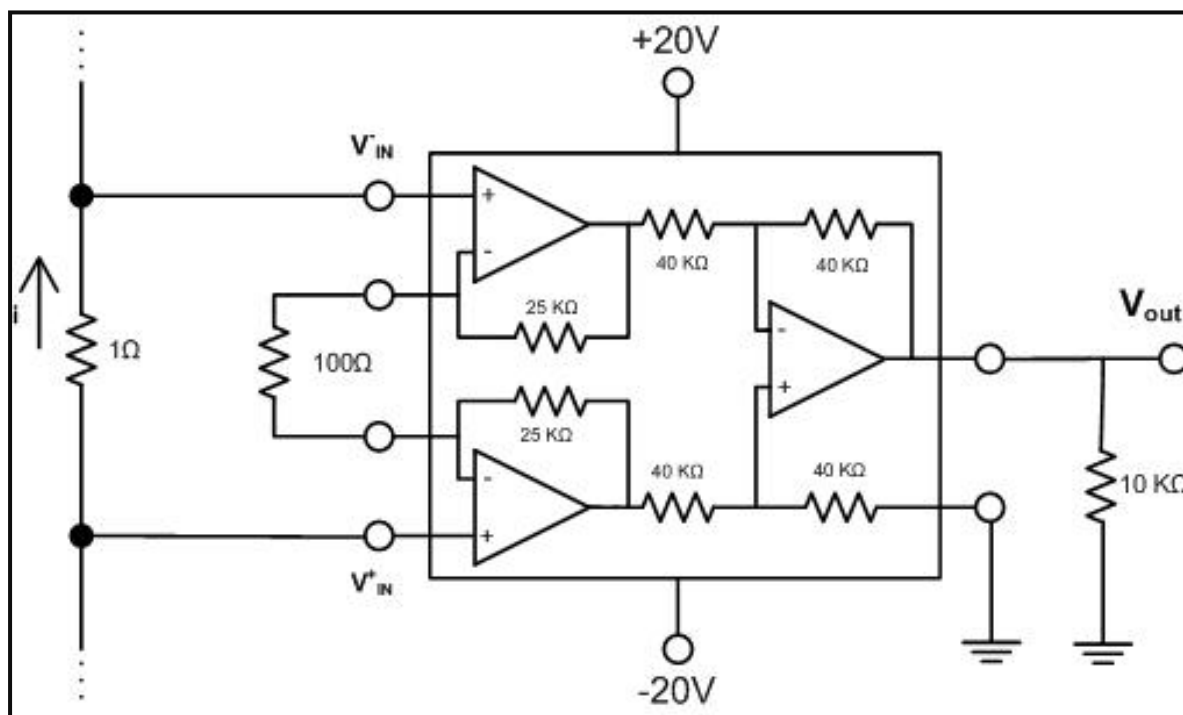


Figura 2.19 – Amplificador de instrumentação utilizado para medir o consumo do módulo medidor

Para verificar a curva de consumo do módulo utilizando o circuito implementado é necessário abrir a alimentação do medidor e inseri-lo em série com o mesmo, bem como ligar um osciloscópio a saída para verificar as curvas.

2.8 Emulador de Corrente

Nos testes iniciais realizados em laboratório foram utilizadas lâmpadas incandescentes para gerar as cargas que os módulos iriam medir. Porém, não era possível atingir 10 A com esse sistema e também havia uma oscilação considerável na corrente ao longo do tempo, em virtude da variação de temperatura, o que tornava a medida extremamente imprecisa.

Essas limitações comprometiam muitos os testes em laboratório, uma vez que o fundo de escala do módulo medidor chega a 100 A e, em alguns ensaios, os mesmos seriam submetidos a uma corrente constante por um longo período, portanto não poderia haver uma variação na corrente.

Para eliminar esse inconveniente nos testes em laboratório, foi projetado um gerador de corrente que possibilita alcançar um campo magnético equivalente a uma corrente de 200 A na carga. A Figura 2.20 apresenta o esquemático do sistema construído.

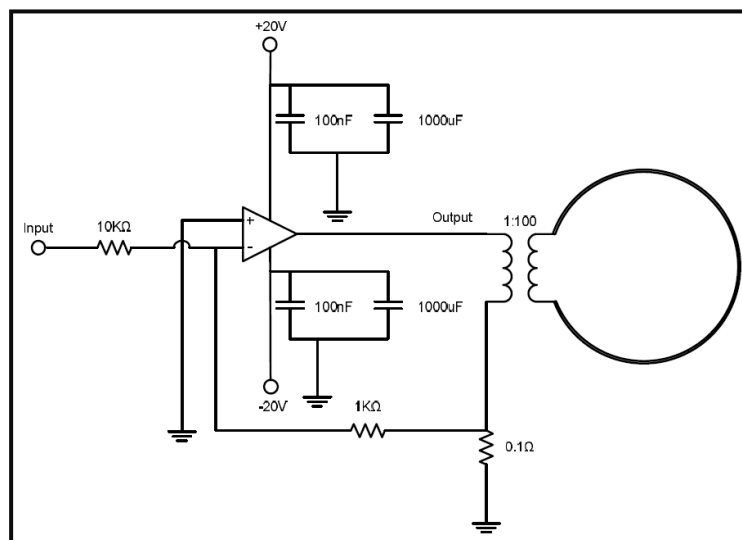


Figura 2.20 – Esquema elétrico do gerador de corrente

No projeto do gerador foi utilizado um amplificador operacional [13] na configuração tensão-corrente no qual amplifica um sinal senoidal de 60 Hz originário de um gerador de sinais.

Para testar os módulos em toda sua faixa de operação, foram utilizadas 100 espiras na confecção na bobina e assim consegue-se gerar um campo magnético equivalente a uma corrente de até 200 A, ou seja, o dobro do fundo de escala que o medidor consegue mensurar. A corrente aplicada à bobina é monitorada através de um resistor *shunt* com uma resistência conhecida.

Capítulo 3

Resultados Experimentais

3.1 *Offset* dos Medidores

Durante os testes realizados em laboratório constatou-se que os conversores A/D utilizados para medir a corrente da “garra” podem ter uma tensão de *offset* razoavelmente grande, na ordem de 50 para o fundo de escala de 2^{16} , o que compromete as medidas realizadas para baixos níveis de corrente. A Figura 3.1 apresenta o valor medido para o *offset* em doze medidores testados.

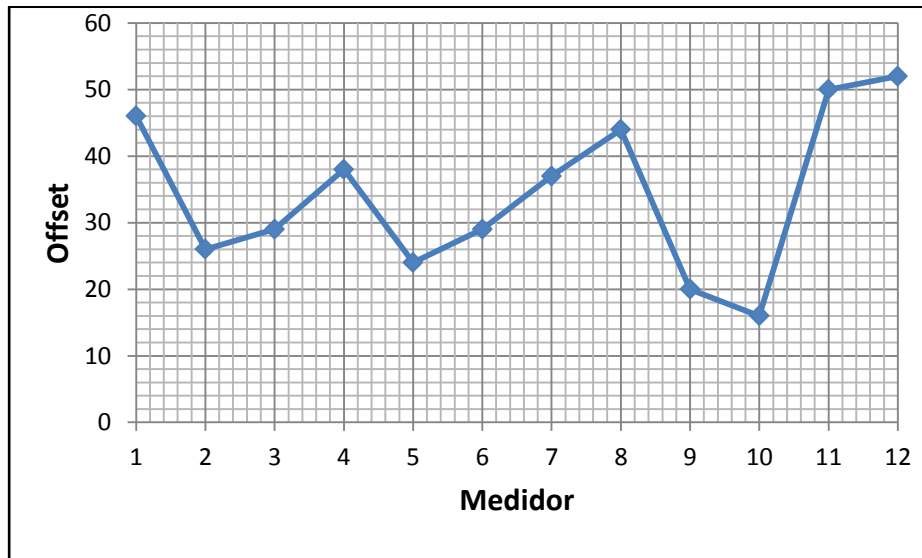


Figura 3.1 – Offset dos dispositivos testados

Os testes mostraram que os erros nas medidas para correntes inferiores a 0,8 A são importantes e poderiam comprometer os resultados em residências com baixo consumo. E, muito pior do que um erro no valor medido causado pelo *offset*, é o fato de que a tensão de *offset*

encontrada era suficiente para que o sistema não detectasse o cruzamento do zero da rede, resultando no descarte da medida pelo medidor.

Nas medidas realizadas em laboratório para níveis muito baixos de corrente, inferiores a 0,3 A, foram observados erros na ordem de 20%. Embora este valor de consumo seja muito baixo (equivalente a uma carga de aproximadamente 40 W), era uma fonte de erro que poderia influenciar os resultados finais, principalmente pelo fato de haver fontes de incertezas ligadas ao valor da tensão e ao fator de potência na estimativa do consumo do cliente sob investigação.

Para evitar esse inconveniente e eliminar tal fonte de incerteza nos resultados das medidas, foi desenvolvida uma nova metodologia de calibração para os medidores, na qual foi possível eliminar os erros de *offset* presentes nos conversores A/D, evitando o problema da não detecção do cruzamento do zero e os erros nas medidas de pequenos valores das correntes.

Após a implementação dessa nova metodologia de calibração, foi realizado um teste para uma gama de correntes de entrada no qual o erro total do sistema (erros da “garra” + erros do sistema de medida eletrônico) foi inferior a 0,1%. Esse é um resultado excelente em relação ao que inicialmente se esperava obter com o módulo medidor. A Figura 3.2 mostra a curva da medida realizada na faixa de 0,04–1 A para o módulo sob teste. Mesmo para correntes muito pequenas, o módulo de medida apresentou uma linearidade excelente, com erro abaixo de 1,0%.

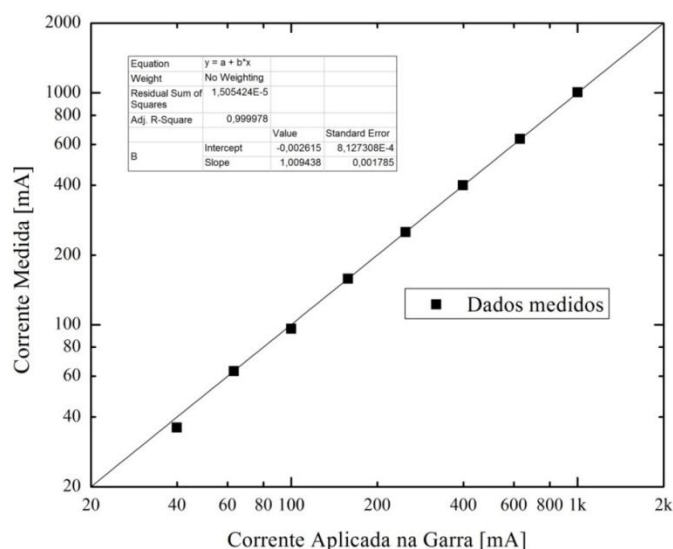


Figura 3.2 – Medidas realizadas na faixa de 0,04–1 A em um módulo calibrado com a nova metodologia

A Figura 3.3 apresenta a curva para as medidas realizadas em toda a faixa de operação do sistema. Observa-se que o erro de não linearidade é praticamente desprezível.

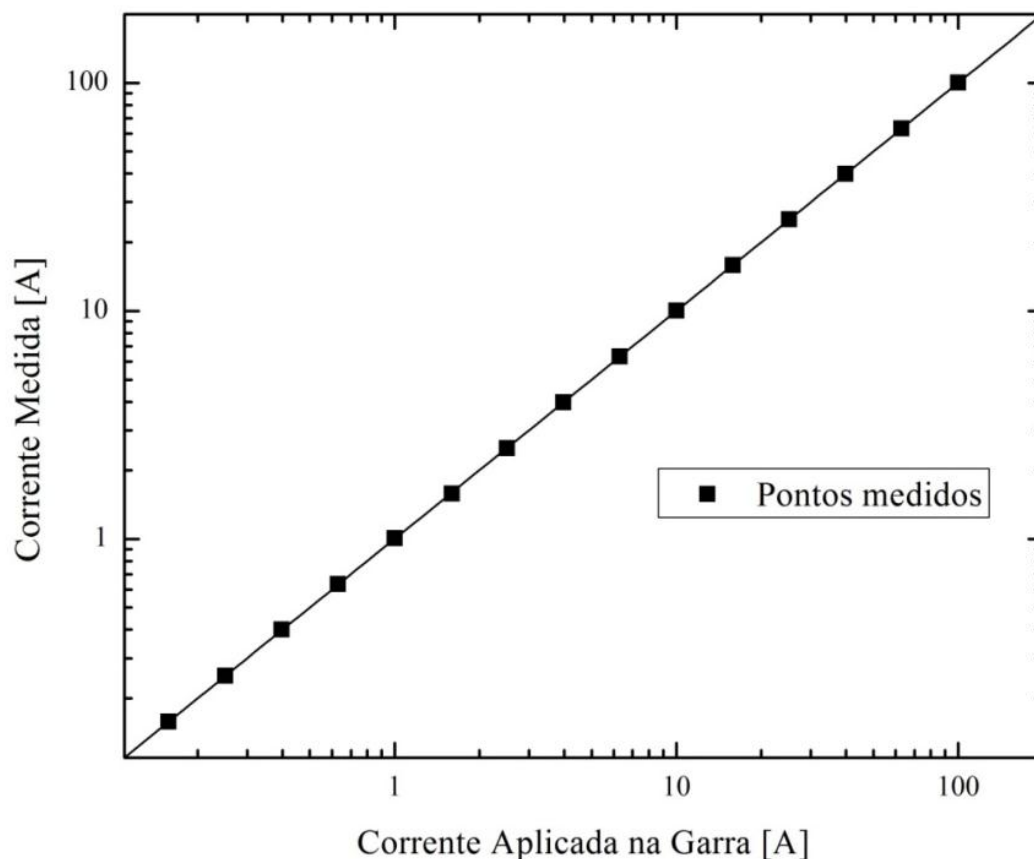


Figura 3.3 – Medidas realizadas na faixa de 40 mA a 100 A em um módulo calibrado com a nova metodologia

Portanto, com essa nova metodologia de calibração foi possível eliminar os erros ligados ao *offset* dos medidores.

3.2 Erro relativos entre medidores

Após calibração dos medidores usando a nova metodologia, foi realizado um ensaio em laboratório para verificar o erro entre medidores. Estes foram utilizados para mensurar a mesma corrente durante um longo período. Logo após foi levantada a curva do erro entre os mesmos, o resultado obtido foi de um erro inferior a 0,3%, conforme apresentado na Figura 3.4.

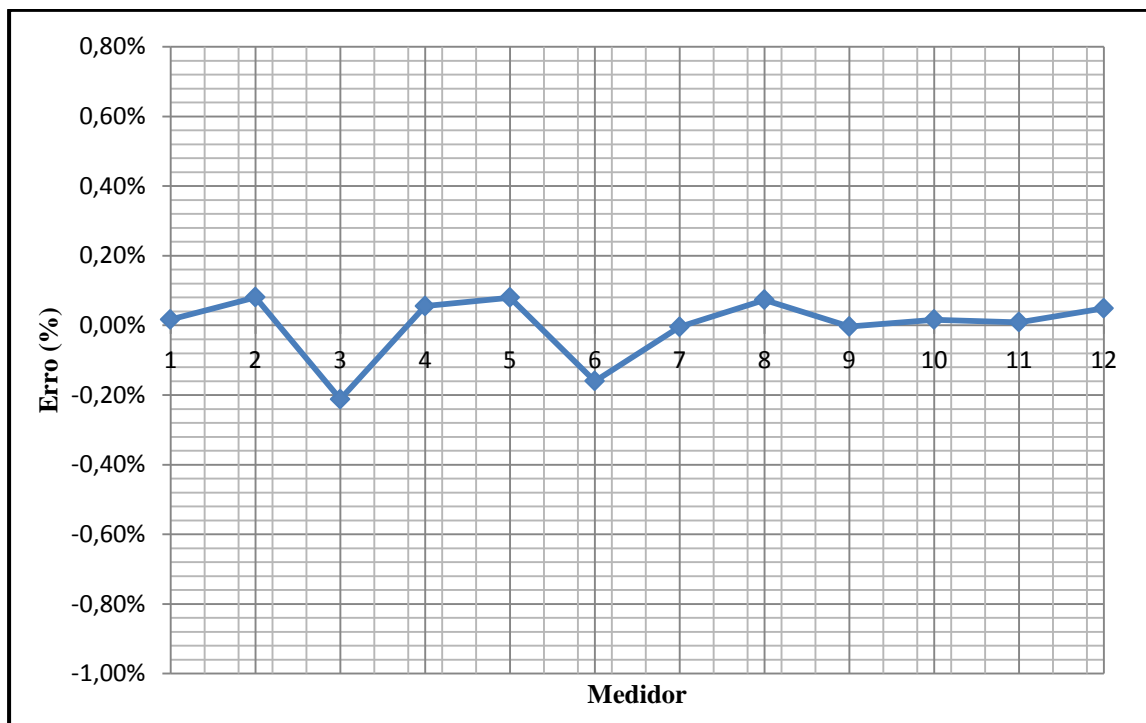


Figura 3.4 – Percentual de erro entre medidores testados em Laboratório

3.3 Consumo do Medidor

Um dos principais problemas enfrentado no projeto do módulo medidor foi seu consumo, uma vez que a bateria deveria possuir autonomia de no mínimo um ano. Os principais subsistemas que contribuem para o elevado consumo de energia pelo módulo medidor são: o conversor sigma-delta e a comunicação sem fio. Em seguida são apresentados detalhes sobre estes dois módulos.

3.3.1 Consumo: Conversor sigma-delta

Foram realizados vários experimentos para levantar o consumo total do módulo medidor. Em seu regime normal de funcionamento, sem o conversor sigma-delta e o rádio estarem ativos, o consumo do módulo medidor é de aproximadamente 255 μA . A Figura 3.5 apresenta a curva do consumo médio do medidor, bem como os pulsos do conversor sigma-delta no instante da realização da conversão A/D com uma frequência de 1 leitura por segundo (lembrando que cada leitura é realizada durante 3 ciclos da rede).

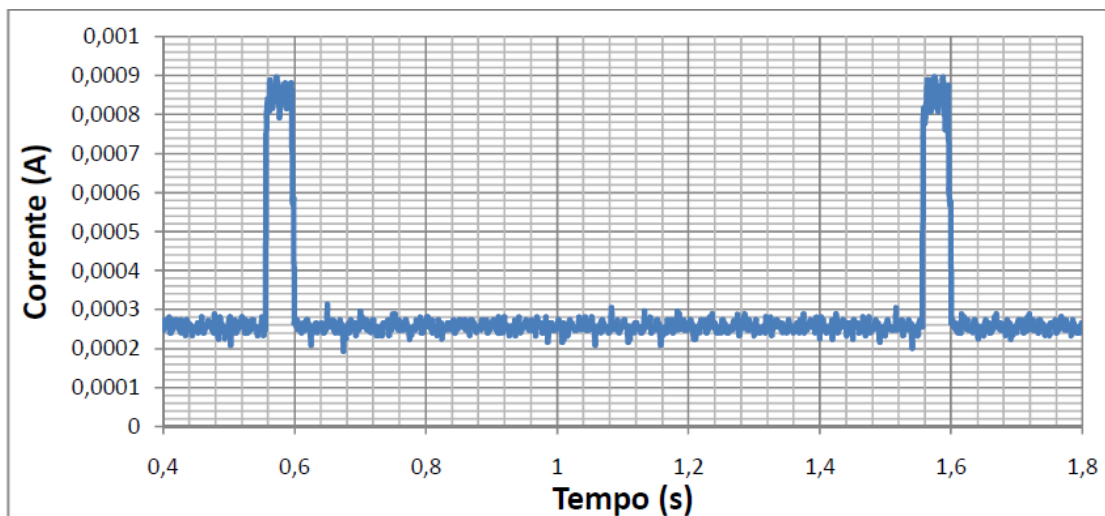


Figura 3.5 – Medidor em campo: Sigma-Delta a cada 1s

Essa estratégia tem por objetivo diminuir o consumo do medidor no momento da realização da conversão A/D, uma vez que, para realizar uma medida, o conversor sigma-delta consome aproximadamente 600 μA . A idéia central é deixar o conversor sigma-delta desligado o maior tempo possível, ficando inativo por 95% do tempo e nos outros 5% ficando ativo para realizar as conversões. A Figura 3.6 ilustra a largura do pulso do conversor sigma-delta no momento da realização da conversão.

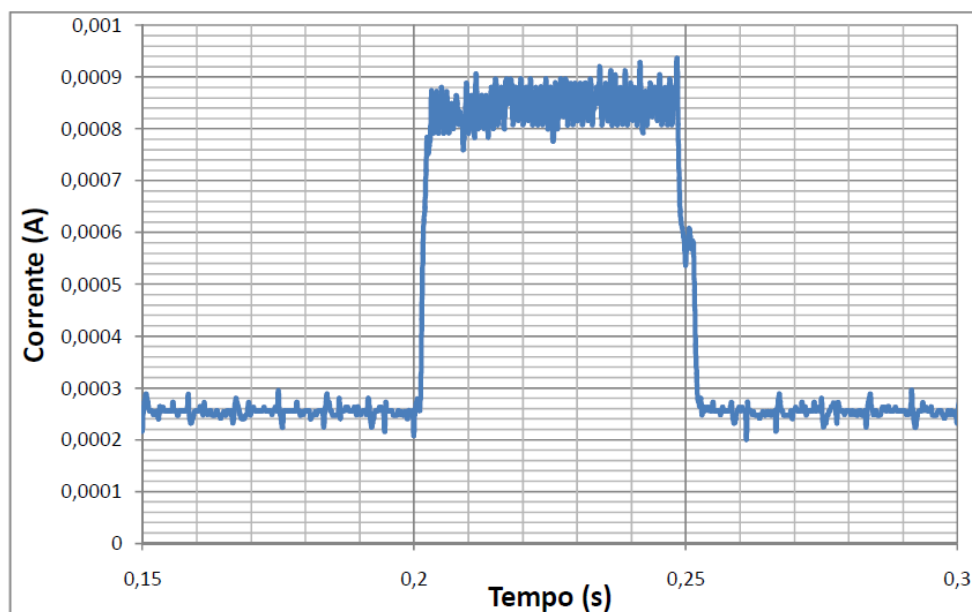


Figura 3.6 – Sigma-Delta: Amplitude e Período do pulso

Com essa metodologia, foi possível obter um consumo médio em torno de 285 μA para o módulo medidor realizando medidas em campo, reduzindo drasticamente o consumo e proporcionando uma maior autonomia da bateria.

3.3.2 Consumo: Comunicação sem fio

Como a comunicação com o módulo medidor não pode ser realizada através do uso de conectores, devido ao fato do mesmo ficar exposto às intempéries, foi utilizada comunicação sem fio para realizar as leituras dos dados do medidor.

O maior desafio enfrentado no projeto do módulo medidor, em relação ao consumo, foi o rádio, pois para transmitir e receber dados seu consumo médio chega a 16,65 mA, isso representa aproximadamente 62 vezes o consumo do módulo realizando medidas em campo.

Com esse consumo elevado do rádio, a bateria do módulo não iria atingir o tempo de vida esperado (mínimo de um ano).

Para aumentar a autonomia do módulo foram implementadas algumas funcionalidades, tais como: o rádio somente será ativado quando for mensurada uma corrente inferior a 0,04 A e por um tempo máximo de 50 ms. Se neste intervalo de tempo não chegar requisição para o módulo, o rádio será desativado e só voltará a ficar ativo quando passar cinco segundos. A Figura 3.7 apresenta a curva de consumo que o rádio atinge quando fica ativo, bem como a frequência na qual ele acorda.

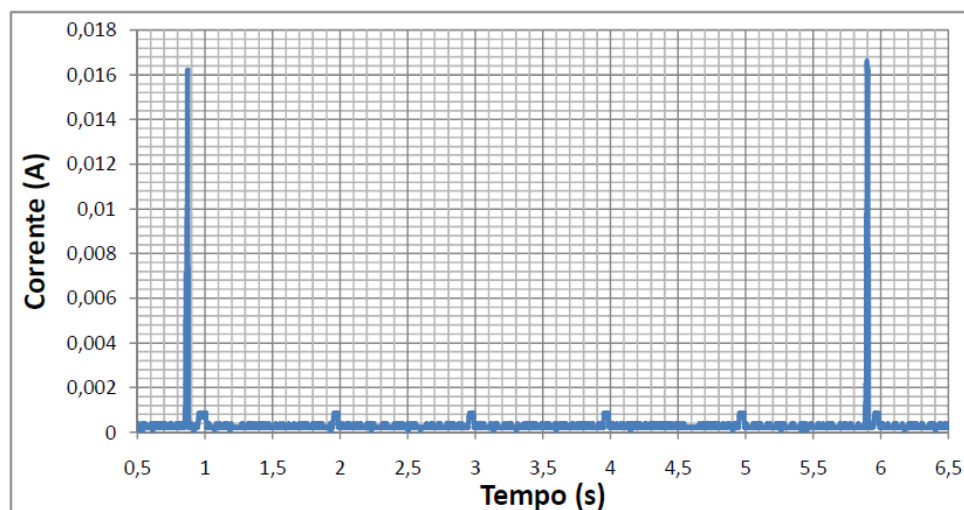


Figura 3.7 – Rádio: Amplitude e Período do pulso

Adotando tais funcionalidades, conseguiu-se reduzir drasticamente o consumo do módulo medidor sem comprometer a comunicação com o mesmo.

3.4 Experimento em Laboratório

Para verificar o nível de precisão dos medidores, os mesmos, foram submetidos a ensaio em laboratório utilizando o gerador de corrente da Figura 2.20, sendo que neste experimento foi utilizada uma corrente nominal de 100 A, que é o fundo de escala dos módulos medidores.

Como exposto anteriormente, os módulos medidores realizam medidas indiretas, ou seja, através da medição da corrente calcula-se a energia consumida pela unidade consumidora ou um determinado equipamento em específico. Porém, para realizar o cálculo da energia consumida é necessário conhecer também a tensão de alimentação e o fator de potência da referida unidade ou equipamento.

No experimento realizado em laboratório, os medidores foram submetidos a uma corrente constante de 100 A, por um período 12 horas, totalizando 1200 Ah. A Figura 3.8 apresenta a resposta dos medidores em relação a essa energia, dada em percentual.

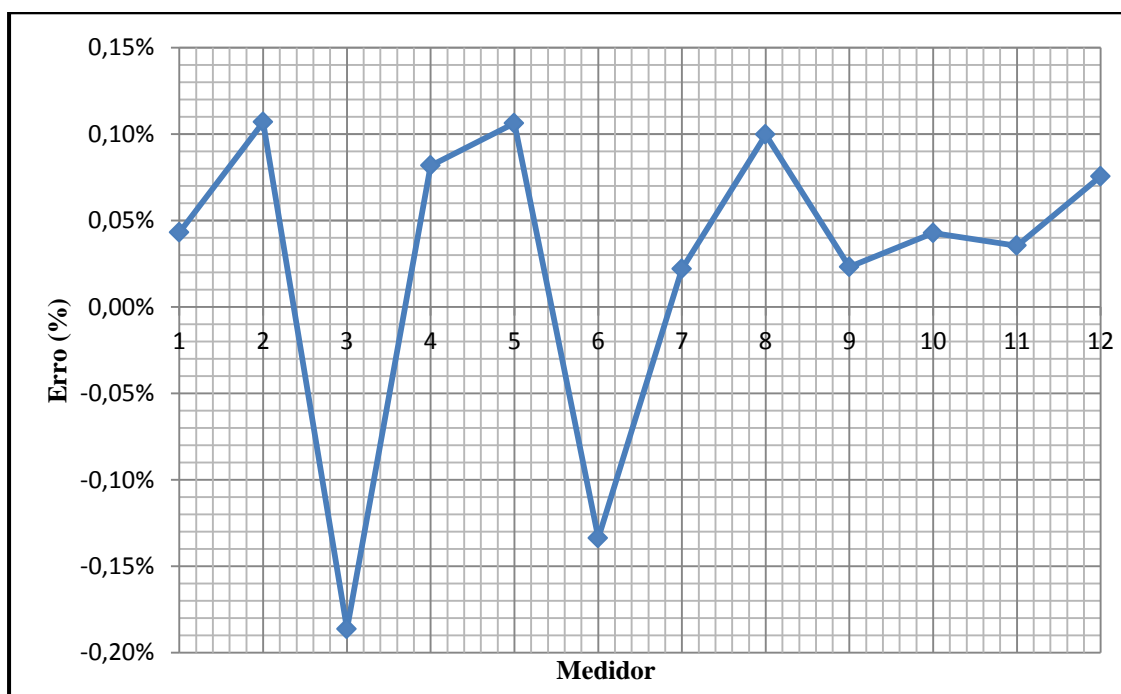


Figura 3.8 – Resposta dos medidores em relação a uma carga conhecida

Portanto, para uma carga conhecida, os medidores apresentaram resultados com erro máximo inferior a 0,2%. Lembrando que os testes em laboratório foram realizados a temperatura ambiente.

3.5 Experimento em Campo

Após a realização dos testes em laboratório e a constatação que os medidores apresentavam erro inferior a 0,2% foi realizado experimentos em campo para validar a resposta dos mesmos para cargas não conhecidas.

Para os testes em campo, deve-se considerar, para o cálculo da energia, a tensão de alimentação e o fator de potência. Estes valores serão estimados para cada residência, uma vez que a medida realizada é apenas da corrente.

Para os medidores que serão utilizados pela AES Eletropaulo em São Paulo, foi realizado estudo técnico para estimar qual a tensão de alimentação das regiões onde os medidores serão instalados, e foi observado que a variação de tensão para cada região não ultrapassa $\pm 3,86\%$ em relação ao valor nominal [14].

Já, para o fator de potência, foi realizado estudo dos equipamentos que mais influenciam no cálculo da energia consumida, onde foi fixado que o fator de potência médio a ser utilizado na região sobre estudo, que é a área de cobertura da AES Eletropaulo na cidade de São Paulo é 0,76 [15]. Nos testes em realizados em Campinas-SP serão utilizados estes dados de fator de potência para o cálculo da energia consumida, já que não existe nenhum estudo disponível sobre este dado na região da distribuidora local.

Objetivando validar a resposta dos medidores, foram realizados quatro testes em campo, em residências distintas: Casa 1, Casa 2, Casa 3 e Casa 4. A Tabela 3.1 mostra os dados de cada medidor, bem como a comparação com o valor de leitura do medidor eletromecânico (Relógio) de cada residência.

Tabela 3.1 – Testes realizado em campo

Casa	End	Tensão: (V)	Corrente LO: (mAs)	Corrente HI: (mAs)	Energia: kWh	Medidor: kWh	Relógio: kWh	Divergência: %
1	1	128	1215279850	455280111	49,03	80,69	72,50	10,15
	3	128	1215707973	454523198	49,01			
	4	130	552321969	456326809	31,64			
	5	130	538703526	468728233	31,71			
2	8	130	843419746	379913900	36,87	68,87	71,50	-3,83
	10	130	810891003	413698889	37,19			
	9	128	696040763	366385972	31,84			
3	2	128	730065172	24769	19,73	98,55	104	-5,54
	4	128	699406500	773485	18,93			
	6	128	2215083547	924446	59,89			
4	1	128	784518942	121665636	25,525	57,35	55,50	3,23
	3	128	787655019	117889500	25,476			
	5	128	904052071	210002079	31,896			
	7	128	910197977	202953144	31,812			

Para o presente teste, foram usados dois métodos em relação à tensão de alimentação da residência: para as casas 1 e 2 a tensão foi medida antes e após a retirada dos módulos enquanto que para as casas 3 e 4 a tensão foi estimada, mesmo procedimento que será utilizado pela equipe da Eletropaulo.

Tal como no experimento realizado em laboratório, onde todos os medidores foram submetidos para mensurar a mesma corrente como o objetivo de verificar a similaridades das respostas dos mesmos, no experimento em campo, também foi usado redundância. Foram utilizados dois medidores por fase na casa 1, casa 2 e na casa 4, em uma das fases, foi utilizado somente um medidor.

Como o fator de potência influencia diretamente no cálculo da energia consumida, a resposta do medidor é dividida em duas partes: Corrente LO e Corrente HI, ambas dadas em mAs. Sendo que a Corrente HI é a parte da energia consumida onde o fator de potência é igual a 1, ou seja, cargas puramente resistivas, tais como chuveiros, secadores de cabelo, máquina de lavar louça, entre outros, desde que a carga seja maior do que 15 A. Portanto, o total da energia consumida pela residência será a soma da energia referente a Corrente LO mais a parte da Corrente HI.

Como exposto anteriormente, o medidor é aplicável em situações potenciais de fraudes indicadas pelas análises de bancos de dados e tecnologias da informação (TI) já existentes. A resposta do medidor poderá indicar três resultados distintos em relação a divergência: inferior a 5%, indica que o consumidor não é fraudador; acima de 15%, consumidor é fraudador e de 5% a 14% consumidor classificado como indefinido e será colocado em uma nova lista para ser analisado futuramente, uma vez que os consumidores ditos fraudadores possuem maior prioridade para a etapa de inspeção.

Após essa etapa de pré-inspeção, os clientes classificados como prováveis fraudadores, receberão uma visita das equipes de inspeção da AES Eletropaulo para verificar as condições do padrão de entrada.

Para os quatro experimentos realizados em campo conclui-se que os resultados das casa 2, casa 3 e casa 4 indicam que os clientes estão dentro da margem de consumidor não fraudador de energia elétrica. Já o resultado da casa 1 aponta que o consumidor esta dentro da margem de indefinição. Esse resultado pode ser explicado pelas características dos equipamentos existentes na casa 2, que foge do padrão de residência abordado pelo estudo [15], já que foi verificado que possuem um fator de potência bem inferior a 0,76, valor utilizado para o cálculo da energia consumida.

Portanto, os resultados dos experimentos realizados em campo evidenciam que os medidores possuem resposta dentro da margem esperada.

Capítulo 4

Conclusão

4.1 Conclusão

Foi desenvolvido um módulo medidor utilizando microcontrolador da família MSP430AFE2xx da *Texas Instruments* que realiza medidas indiretas de corrente e realiza comunicação via wireless para obtenção dos dados.

Através da aplicação das várias técnicas apresentadas neste manuscrito, foi possível reduzir o consumo médio do módulo para 285 μA , proporcionando uma autonomia de pouco mais de um ano para a bateria.

Nos testes realizados em laboratório para uma carga conhecida e ambiente controlado, os medidores apresentaram resultados com erro inferior a 0,2%, indicando que os erros de avaliação na pré-inspeção deverão ser basicamente originários dos valores estimados, estatisticamente, da tensão e fator de potência.

Nos testes realizados em campo, para várias residências, obteve-se uma divergência de cálculo do valor da energia em torno de 5% quando comparado com os valores lidos no medidor eletromecânico.

4.2 Sugestão para trabalhos futuros

O protótipo desenvolvido está entrando em fase de teste de campo na AES Eletropaulo, porém já é possível identificar uma série de melhorias que seriam desejáveis para uma próxima versão do módulo medidor, dentre as quais citamos:

- Desenvolver uma interface amigável que possibilite aos usuários realizar as operações de procura dos módulos, leitura e armazenamento dos dados automaticamente sem que o mesmo tenha que entrar com informações para obtê-los. Consequentemente, diminuindo a probabilidade de erro ligado ao tratamento dos dados pelo usuário.
- O software a ser desenvolvido deve possuir uma interface que permita identificar facilmente o lote de medidores que se deseja coletar os dados.
- Desenvolver um novo módulo interrogador com antena de alto ganho e maior potência para aumentar a robustez e a eficiência da comunicação com os módulos medidores.
- Desenvolver uma nova técnica que permita estocar os módulos sem que os mesmos consumam bateria, consequentemente, possibilitando a produção em massa.

Desenvolver um sistema com capacidade de medida de correntes mais elevadas, uma vez que este módulo é limitado a 100 A.

Referências Bibliográficas

1. PORTAL Lumière. **Portal Brasileiro da Eletricidade**, 2007. Disponível em: <<http://www.portallumiere.com.br/index.php?strArea=noticias&id=6497>>. Acesso em: 15 Abril 2011.
2. ANEEL. **Medição, faturamento e combate a perdas comerciais**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1623>. Acesso em: 09 Julho 2011.
3. SOUSA, A. N. R. B. L. A. A. R. F. D. **Projeto SAME: Uma experiência de sucesso da CEB Distribuição S/A para automação do faturamento e redução das perdas não-técnicas de seus maiores clientes**, 06 a 10 Outubro 2008 - Olinda - Pernambuco – Brasil.
4. SILVEIRA, A. **Uso da Inteligência Artificial no Processo de Combate às Perdas Comerciais. Workshop Nacional de Recuperação de Energia Elétrica**, Campinas, 7 e 8 Agosto 2008.
5. USER'S Guide MSP430x2xx Family. **Texas Instruments**. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/slau144h/slau144h.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2010.
6. CC2500. **Texas Instruments**. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2500.pdf>>. Acesso em: 25 Janeiro 2011.
7. DUARTE, L. F. C. **Sistema Automatizado Georreferenciado Sem Fio para Irrigação Localizada Auxiliado por Sensor de Umidade do Solo**. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP. Campinas. 2010.
8. CHIP Antena. **Pulse Electronics**. Disponível em: <<http://productfinder.pulseeng.com>>. Acesso em: 12 Janeiro 2011.
9. EZ430-RF2500 Development Tool. **Texas Instruments**. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/slau227e/slau227e.pdf>>. Acesso em: 15 Agosto 2010.
10. T.I Chen Associates. **Low Cost Clamp-on Current Transformers**, 2011. Disponível em: <http://www.tichenassociates.com/Documents/LowCostClamp-onCT_Brochure.pdf>.
11. OMNICEL. **Bateria Datasheet**, 2011.
Disponível em: <<http://www.omnicel.com/spec/er-14250.pdf>>.

12. INA121. **Texas Instruments**, 2011. Disponível em:
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina121.pdf>>.
13. LM3886. **National Semiconductor**, 2011. Disponível em:
<<http://www.national.com/ds/LM/LM3886.pdf>>.
14. LTDA, L. H. A. E. C. E. **Especificação e caracterização de uso de equipamento de medida**. Projeto de P&D ANEEL - N° do contrato: 4200008605. Campinas, p. 31. 2010.
15. EMPRESARIAL, L. H. A. E. C. **Estabelecimento da Estratégia de Operação e Logística para Instalação e Remoção de Equipamentos**. Campinas-SP. 2011.